

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
F 0 2 M 51/06		F 0 2 M 51/06	N 3 G 0 6 6
	51/00		S
H 0 1 L 41/083		51/00	E
41/09		H 0 1 L 41/08	S
			U
審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 18 頁)			

(21) 出願番号 特願2001-130168(P2001-130168)
 (22) 出願日 平成13年4月26日(2001.4.26)
 (31) 優先権主張番号 特願2000-163234(P2000-163234)
 (32) 優先日 平成12年5月31日(2000.5.31)
 (33) 優先権主張国 日本(JP)

(71) 出願人 000004260
 株式会社デンソー
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
 (72) 発明者 村井 敦司
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会
 社デンソー内
 (72) 発明者 小林 正幸
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会
 社デンソー内
 (74) 代理人 100079142
 弁理士 高橋 祥泰

最終頁に続く

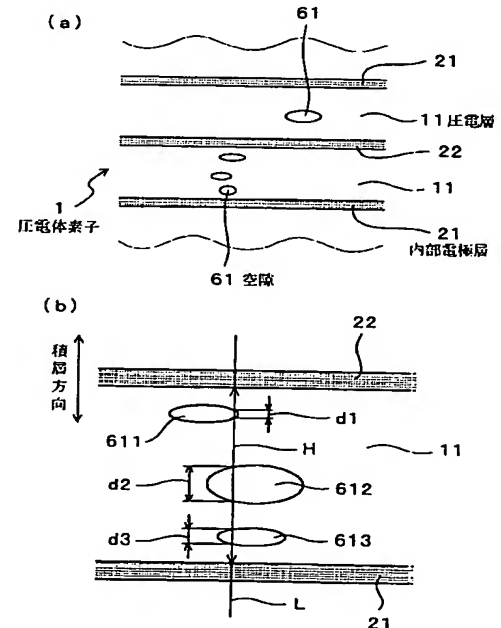
(54) 【発明の名称】 インジェクタ用圧電体素子

(57) 【要約】

【課題】 インジェクタの駆動源に最適な圧電体素子を提供すること。

【解決手段】 インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層11と印加電圧供給用の内部電極層21、22とを交互に積層してなり、各圧電層11には空隙61、611～613が含まれており、一つの圧電層11に含まれる空隙61、611～613の積層方向の総厚みは圧電層11の積層方向厚みの1/3以下であると共に、一つの空隙61、611～613の積層方向厚みは50μm以下である。

(図1)



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 インジェクタに内蔵されると共に該インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、該圧電体素子は、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層と印加電圧供給用の内部電極層とを交互に積層してなり、上記各圧電層には空隙が含まれており、一つの圧電層に含まれる空隙の積層方向の総厚みは圧電層の積層方向厚みの $1/3$ 以下であると共に、一つの空隙の積層方向厚みは $50\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 2】 請求項 1 において、上記圧電体素子は 2×10^9 回以上駆動することが可能であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 3】 インジェクタに内蔵されると共に該インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、該圧電体素子は、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層と印加電圧供給用の内部電極層とを交互に積層してなり、上記内部電極層の厚みは、上記圧電層の厚みの 0.11 倍以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 4】 請求項 3 において、上記内部電極層の厚みは $12\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 5】 インジェクタに内蔵されると共に該インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、該圧電体素子は、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層と印加電圧供給用の内部電極層とを交互に積層してなり、上記圧電層における圧電層積層方向と垂直な積層面の面積 S_1 と、該積層面を覆う内部電極層の面積 S_2 との間には、 $70\% \leq S_2/S_1 \leq 98\%$ という関係が成り立つことを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 6】 請求項 1～5 のいずれか一項において、上記圧電体素子は、上記圧電層の積層方向において、駆動部と該駆動部を挟持するように配置されたバッファ部と、該バッファ部を挟持するように配置されたダミー部に区分けされており、上記駆動部、バッファ部、ダミー部は、電圧印加時における伸縮量が駆動部、バッファ部、ダミー部の順に小さくなるように構成されており、上記バッファ部における圧電層の厚みは、駆動部における最も薄い圧電層の厚みの $1.1 \sim 5.0$ 倍であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 7】 請求項 6 において、上記駆動部における圧電層の厚みは $280\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 8】 請求項 6 または 7 において、上記バッファ層は複数の圧電層を有することを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 9】 請求項 6～8 のいずれか一項において、上記駆動部と上記バッファ部とは交互に複数個配置されていることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 10】 請求項 6～9 のいずれか一項において、上記ダミー部における圧電層の厚みは、上記駆動部における最も薄い圧電層の厚みの 3 倍以上であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 11】 請求項 1～10 のいずれか一項において、上記内部電極層は Ag と Pd とを含む $\text{Ag} \cdot \text{Pd}$ 含有材料よりなることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 12】 請求項 11 において、上記 $\text{Ag} \cdot \text{Pd}$ 含有材料において、 Ag と Pd との合計重量に対し、 Pd は 10 重量%以上含有されていることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 13】 請求項 11 または 12 において、上記 $\text{Ag} \cdot \text{Pd}$ 含有材料を構成する焼結粒子は粒径 $10\mu\text{m}$ 以下のものが焼結粒子全体の 80% 以上を占めていることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 14】 請求項 1～13 のいずれか一項において、上記圧電層はジルコン酸チタン酸鉛を主成分とすることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 15】 請求項 14 において、上記圧電層は Mn が含有され、該圧電層に対し、 Mn が $5 \times 10^{-3} \sim 0.4$ 重量%含まれていることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 16】 請求項 14 または 15 において、上記ジルコン酸チタン酸鉛は $\text{Pb}(\text{Y}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$ 系 3 成分固溶体を基本組成とし、上記 3 成分固溶体中の各成分の割合が、 $0.5\text{mol}\% \leq \text{Pb}(\text{Y}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 \leq 3\text{mol}\%$ 、 $42\text{mol}\% < \text{PbTiO}_3 < 50\text{mol}\%$ 、 $47\text{mol}\% < \text{PbZrO}_3 \leq 57.5\text{mol}\%$ であり、 Sr による Pb の置換基が $5\text{mol}\%$ より多く $15\text{mol}\%$ 以下であり、 Nb_2O_5 の上記ジルコン酸チタン酸鉛に対する含有量が 1 重量%以下、 Mn_2O_5 の上記ジルコン酸チタン酸鉛に対する含有量が 0.01 重量%以上、 0.5 重量%未満であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 17】 請求項 1～16 のいずれか一項において、上記圧電層を構成する焼結粒子は粒径 $8\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【請求項 18】 請求項 1～17 のいずれか一項において、内燃機関の 1 回の燃焼に対して複数回の駆動を行なうことを特徴とするインジェクタ用圧電体素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【技術分野】本発明は、インジェクタの駆動源として用いられる積層型の圧電体素子に関する。

【0002】

【従来技術】自動車の内燃機関等のインジェクタ（燃料噴射装置）は、例えば、高圧燃料を蓄積したコモンレールに接続された 3 方弁又は 2 方弁の弁体を動かすことにより、燃料通路の開閉状態を切り替えてノズルニード

ルに付与される圧力状態を変化させ、ノズルニードルを開弁状態にすることにより燃料を噴射するよう構成されている。

【0003】そして、上記弁体を動かす駆動源としては、電磁弁等が一般的に使用されている。これに対し、上記駆動源をきめ細かく制御して燃料噴射状態の精密な制御を行うことを目的に、例えば特開平 11-229993 号公報に示されるように、上記駆動源として積層型の圧電体素子を使用しようとする試みがなされてきた。

【0004】

【解決しようとする課題】しかしながら、圧電体素子を駆動源に用いたインジェクタは、上記のごとく提案されているものの、実用化には未だ至っていない。インジェクタの種類によっては、例えば 100MPa を超えるような高圧燃料を噴射することが要求され、このため過酷な使用環境下での信頼性がインジェクタ用圧電体素子には必要である。

【0005】他の分野で利用される従来の圧電体素子を、このようなインジェクタに用いた場合、上記のごとき過酷な使用環境から短時間で圧電体素子が割れたり、内部電極層に生じる断線、またはクラックによりショートする等して、実用に耐えないことが多かった。更に、このような高圧燃料噴射に際しては、例えば変位量が $20\mu\text{m}$ 以上、発生力 1000N 以上という非常に高性能な圧電体素子が必要である。この点からも従来の圧電体素子をそのままインジェクタに転用することは難しかった。

【0006】本発明は、かかる従来の問題点に鑑みてなされたもので、インジェクタの駆動源に最適な圧電体素子を提供しようとするものである。

【0007】

【課題の解決手段】請求項 1 に記載の発明は、インジェクタに内蔵されると共に該インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、該圧電体素子は、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層と印加電圧供給用の内部電極層とを交互に積層してなり、上記各圧電層には空隙が含まれており、一つの圧電層に含まれる空隙の積層方向の総厚みは圧電層の積層方向厚みの $1/3$ 以下であると共に、一つの空隙の積層方向厚みは $50\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子にある。

【0008】本発明において最も注目すべきことは、一つの圧電層に含まれる空隙の積層方向の総厚みは圧電層の積層方向厚みの $1/3$ 以下であると共に、一つの空隙の積層方向厚みは $50\mu\text{m}$ 以下である。

【0009】図 1 (b) に示すごとく、圧電層 11 の積層方向と平行な直線 L を考える。また、直線 L 上の圧電層 11 の積層方向厚みを H とする。この時、直線 L と重なる全ての空隙 611、612、613 の、L と重なった部分の各厚み $d1 \sim d3$ を合計した値が積層方向の総厚みとなる。よって、図 1 (b) において、仮に $d1$

$+d2+d3 \leq H/3$ となれば本請求項にかかる要件が満たされる。本発明にかかる圧電体素子では、圧電層 11 のどの部分に直線 L を設けてもこの関係が成立する。

【0010】仮に空隙の積層方向総厚みが $1/3$ より大となると、電圧印加時に圧電層で絶縁破壊が生じるおそれがある。このような圧電体素子は耐電圧性が低くインジェクタの駆動源に使用できないおそれがある。

【0011】また、図 1 (b) に示すごとく、空隙 611、612、613 と直線 L との重なった部分での厚み $d1 \sim d3$ のいずれについても $50\mu\text{m}$ 以下であれば、本請求項にかかる『一つの空隙の積層方向厚みは $50\mu\text{m}$ 以下』という要件が満たされる。本発明にかかる圧電体素子においては、圧電層のどの部分に直線 L を設けてもこの関係が成立する。

【0012】仮に空隙の厚みが $50\mu\text{m}$ を越えた場合は、圧電層の厚みに対し相対的に大きな空隙が存在するため、圧電層の絶縁破壊が生じやすくなるおそれがある。このような圧電体素子は耐電圧性が低く、インジェクタの駆動源として使用できないおそれがある。

【0013】次に、本発明の作用につき説明する。前述したごとく、インジェクタの駆動源として用いる圧電体素子には、例えば 100MPa を超えるような高圧燃料を噴射することが要求されるため、過酷な使用環境下での信頼性が要求される。

【0014】インジェクタ用の圧電体素子は、例えば変位量が $20\mu\text{m}$ 以上、発生力 1000N 以上という高性能を発揮することが要求される。さらに、圧電体素子の小型化に伴って圧電層は薄くなる傾向があるが、付与される電界強度は 1.0 kV/mm 以上と高くなる傾向がある。

【0015】圧電層は圧電性のセラミック焼結体よりなる。圧電体素子は、後述するごとく、圧電材料の主原料を含有するスラリーからグリーンシートを作製し（これが圧電層となる）、これを適宜積層して作製した未焼結層体を焼結して製造する。例えばスラリー塗布時に空気が入り込む、スラリーに含まれるバインダーが焼結後に焼失する等の理由から、圧電層内部に空隙が形成されることがある。

【0016】空隙を有する圧電層は、駆動回数が多く、高い電界強度にさらされるインジェクタ用圧電体素子としての過酷な環境下において容易に絶縁破壊が発生し、ショートする。これに伴い圧電体素子の耐久性や性能が多いに低下することがある。

【0017】空隙を有する圧電層に電圧を印加した場合、空隙も圧電層の他の部分と同様に電圧が印加される。このため、空隙はプラスとマイナスとに分極する。分極した空隙が圧電層の積層方向に多数存在した状態で、例えば電界強度 1.0 kV/mm 以上の高い駆動周波数による駆動を繰り返した場合、電圧印加方向で圧電層が薄くなった部分で絶縁破壊が生じ、ショートの原因

となる。

【0018】本発明にかかる圧電層は、圧電層の著しい絶縁低下を招かない程度の小さな空隙しか含んでいない。つまり、本発明にかかる圧電層は電圧印加時の絶縁性が高く、上述した問題が生じ難い。よって、上述の要件を満たす圧電層から構成された圧電体素子は耐久性に優れ、長期にわたって過酷な環境で使用可能で、インジェクタの駆動源として適している。

【0019】以上、本発明によれば、インジェクタの駆動源に最適な圧電体素子を提供することができる。

【0020】次に、請求項2記載の発明は、上記圧電体素子は 2×10^9 回以上駆動することが可能であることが好ましい。これにより、自動車の内燃機関のインジェクタ（燃料噴射装置）の駆動源として適した圧電体素子を得ることができる。

【0021】なぜなら、自動車内燃機関に搭載されるインジェクタは、排ガス浄化、燃費向上のために、1回の燃焼に対して最大5回のマルチ噴射を行うことがある。その上40万km走行の保証が要求される。上述した駆動回数を満たす圧電体素子であれば、このような過酷な要求に答えることができる。

【0022】次に、請求項3記載の発明は、インジェクタに内蔵されると共に該インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、該圧電体素子は、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層と印加電圧供給用の内部電極層とを交互に積層してなり、上記内部電極層の厚みは、上記圧電層の厚みの0.11倍以下であることを特徴とするインジェクタ用圧電体素子にある。

【0023】内部電極層と圧電層の厚み同士の関係が上記要件を満たさず、0.11倍より大となった場合、後述するごとく、内部電極層の端部近傍から圧電体素子の側面に向かうクラック（図7参照）が発生するおそれがある。なお、上記厚みは積層方向に測定した圧電層厚みや内部電極層厚みの最大値である。

【0024】本請求項にかかる発明によれば、圧電層に対して相対的に薄い内部電極層をもった圧電体素子を得ることができる。内部電極層は、図4、実施形態例1に示すごとく、圧電層に対し部分的に設けてある。つまり、内部電極層は、積層方向と直交する一方向において、一端は圧電体素子の側面に露出するが、他端は側面に露出しないよう構成されており、例えば上端から数えて偶数番目の内部電極層は駆動電源の+極に、奇数番目の内部電極層は-極に接続されている。

【0025】この側面に露出しない方の内部電極層の端部では、次のような現象が生じる。即ち、+極と-極の内部電極層と接した部分の圧電層は電圧印加により伸縮する。しかし、内部電極層のない部分、図4において、N部の圧電層同士が隣接する部分では、圧電層は伸縮せず、動かない。このため、内部電極層の圧電体素子外部に露出しない端部付近では、伸縮する部分と動かない部

分とが隣接するため、内部応力による歪みが生じやすい。つまり、端部近傍はクラックが発生しやすい部分で、クラック発生状況は後述する図7に記載されている。

【0026】内部電極層を上述したごとく薄くすることで、内部電極層の外部に露出しない端部付近での歪みを減らすことができ、歪み由来のクラック発生を防止することができる。従って、圧電体素子の耐久性を高めることができ、長期にわたって過酷な環境で使用可能である。駆動回数の多いインジェクタの駆動源として適している。

【0027】以上、本発明によれば、インジェクタの駆動力発生用に最適な圧電体素子を提供することができる。

【0028】次に、請求項4記載の発明は、上記内部電極層の厚みは $12 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

【0029】厚みが $12 \mu\text{m}$ より厚い場合は、後述の図7に示すごとく、内部電極層の端部近傍からクラックが発生するおそれがある。なお、上記厚みは積層方向に測定した内部電極層厚みの最大値である。

【0030】本請求項にかかる圧電体素子は、上述したごとく、薄い内部電極層を持っている。従って、上述した請求項3記載の発明と同様に、圧電体素子の耐久性を高めることができ、長期にわたって過酷な環境で使用可能である。駆動回数の多いインジェクタの駆動源として適している。

【0031】次に、請求項5記載の発明は、インジェクタに内蔵されると共に該インジェクタの駆動力を発生する圧電体素子であって、該圧電体素子は、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層と印加電圧供給用の内部電極層とを交互に積層してなり、上記圧電層における圧電層積層方向と垂直な積層面の面積 S_1 と、該積層面を覆う内部電極層の面積 S_2 との間には、 $70\% \leq S_2/S_1 \leq 98\%$ という関係が成り立つことを特徴とするインジェクタ用圧電体素子にある（図10参照）。

【0032】仮に S_2/S_1 が70%未満である際には、電圧が印加される圧電層の面積が減って、伸縮量が減少し、圧電体素子の発生力が低下するおそれがある。一方、98%を越えた際には、内部電極層の端部近傍で、内部電極層と隣接せず圧電層同士が隣接した部分の長さが短くなり、大きな勾配を持つ内部応力がかかって、クラックが発生するおそれがある。

【0033】本請求項にかかる発明によれば、上述の請求項3の場合と同様に、内部電極層の端部付近での歪みを減らすことができ、歪み由来のクラック発生を減らすことができる。従って、圧電体素子の耐久性を高めることができ、長期にわたって過酷な環境で使用可能である。駆動回数の多いインジェクタの駆動源として適している。

【0034】更に、 S_2/S_1 が上述の範囲内にあるた

め、内部電極層の面積が大きく、圧電層のより広い面積に電圧を印加することが可能となる。よって、断面積の小さな圧電体素子（例えば、圧電素子の積層方向・変位方向に垂直な断面積が 80mm^2 以下）であっても、 2000N という非常に高い発生力を得ることができる。なお、プリセット荷重とは圧電体素子の駆動の際に、積層方向の上下の端面から付与する荷重で、過剰変位、オーバーシュートを防ぐために付与されている。

【0035】以上、本発明によれば、インジェクタの駆動力発生用に最適な圧電体素子を提供することができる。

【0036】次に、請求項6記載の発明のように、上記圧電体素子は、上記圧電層の積層方向において、駆動部と該駆動部を挟持するように配置されたバッファ部と、該バッファ部を挟持するように配置されたダミー部に区分けされており、上記駆動部、バッファ部、ダミー部は、電圧印加時における伸縮量が駆動部、バッファ部、ダミー部の順に小さくなるように構成されており、上記バッファ部における圧電層の厚みは、駆動部における最も薄い圧電層の厚みの $1.1 \sim 5.0$ 倍であることが好ましい。

【0037】駆動部、バッファ部、ダミー部よりなる圧電体素子は、駆動時に鼓型となり上下の端面が湾曲する。しかし、圧電体素子は、プリセット荷重を受けながら、大きな発生力を生じるため、プリセット荷重を受ける面は平坦でなくてはならない。そこで、駆動しないダミー層を上下の端面に設けるが、駆動部とダミー部とを直接つなげると、両者の境界においてクラックが発生する。従って、電圧印加時に殆ど動くことができないダミー部を、駆動部よりは少ない伸縮量を持つバッファ部を介して配置することで、クラックの発生を防止することができる。

【0038】そして、本請求項にかかる圧電体素子では、特にバッファ部における圧電層の厚みを上述のごとく限定しているため、バッファ部とダミー部、バッファ部と駆動部とのそれぞれの間でのクラック発生を防止することができる。

【0039】 1.1 倍未満である際は、バッファ部の伸縮量が駆動部に略等しくなることからダミー部とバッファ部との間でクラックが生じやすくなるおそれがある。 5.0 倍より大である場合は、バッファ部の伸縮量が非常に少なく、ダミー層に略等しくなるから、バッファ部と駆動部との間でクラックが生じやすくなるおそれがある。

【0040】上記駆動部、バッファ部、ダミー部は、電圧印加時における伸縮量が駆動部、バッファ部、ダミー部の順に小さくなるように構成されている。具体的には内部電極層間の圧電層厚さを順に厚くし、上端ダミー部の上面及び下端ダミー部の下面には内部電極層を形成しない。従って、駆動回数の多いインジェクタの駆動源に

用いた場合、クラックが発生し難く、長期にわたって使用可能である。

【0041】次に、請求項7記載の発明のように、上記駆動部における圧電層の厚みは $280\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。ここに、特に圧電体素子の積層方向・変位方向に垂直な断面が 80mm^2 以下、変位方向に平行な長さが 60mm 以下といった小型の圧電体素子において、変位による伸び（変位方向に平行）と縮み（変位方向に垂直）の変形量を考える。

【0042】積層方向の長さが等しければ、圧電層の厚い圧電体素子は積層数が少なくなり、圧電層の薄い圧電体素子は積層数が多くなる。両圧電体素子において同じ変位が発生した場合、圧電層の厚い圧電体素子のほうが1層あたりの変位量が大きくなる。

【0043】よって、例えば変位量が $20\mu\text{m}$ 、立ち上がり時間（圧電体素子に電圧を印加してから変位が始まるまでの時間）が $100\mu\text{s}$ と早く、駆動周波数（圧電素子が伸縮する速度）が 200Hz と早い、このような条件では、鼓型の変形が大きくなり、クラックが発生しやすくなる。従って、圧電層の厚みを $280\mu\text{m}$ 以下と薄くすることで、過酷な条件下での信頼性を得ることができる。仮に圧電層の厚みが $280\mu\text{m}$ を越えた場合には、クラックが発生しやすくなり、過酷な条件下での信頼性が低下するおそれがある。

【0044】次に、請求項8記載の発明のように、上記バッファ層は複数の圧電層を有することが好ましい。圧電層が多ければ多いほど、内部応力をよく緩和できるため、複数の圧電層を設けることでクラックに対する余裕がまして、より一層のクラック発生防止効果を得ることができる。従って、駆動回数の多いインジェクタに用いた場合、クラックの発生を防止でき、長期に渡って使用可能である。

【0045】次に、請求項9記載の発明のように、上記駆動部と上記バッファ部とは交互に複数個配置されることが好ましい（図5参照）。駆動部とダミー部との間にバッファ層を配置することで、内部応力をよく緩和することができる。また、バッファ層を駆動部と駆動部の間に配置することで自己発熱を抑ええることができるため、より一層のクラック発生防止効果、温度上昇防止効果を得ることができる。

【0046】特にインジェクタは、通常エンジンの中央部に配置されることが多く、最高温度は 200°C 以上となる。さらに、圧電体素子自体も発熱するため、さらに温度は上昇する。駆動部中にバッファ部を設けることで圧電体素子の自己発熱を抑制し、温度特性の悪化を防止することができる。

【0047】従って、本請求項にかかる圧電体素子は、駆動回数が多く高温下にあるインジェクタの駆動源として、長期にわたって過酷な環境で使用可能である。

【0048】次に、請求項10記載の発明のように、上

記ダミー部における圧電層の厚みは、上記駆動部における最も薄い圧電層の厚みの3倍以上であることが好ましい。これにより、積層方向、変位方向に垂直な面に対しプリセット荷重を均一にかけることができるため、クラック発生を防止することができる。

【0049】インジェクタの駆動源として用いる圧電体素子には上述したとき過酷な条件下において駆動される。例えば変位量が $20\mu\text{m}$ 以上、立ち上がり時間は $100\mu\text{s}$ 等という駆動である。上記条件による駆動が、例えば 200Hz という駆動周波数で行われる場合、後述する図4のN部のような変位しない箇所、駆動されたい箇所に過剰な引張応力がかからないようにする必要がある。

【0050】しかし、駆動部は駆動時にその形状が鼓型となるため、上下の端面からプリセット荷重を加えた場合、駆動部とプリセット荷重を与える面との間が点接触となるおそれがある。この場合、非駆動部であるN部にはプリセット荷重が殆どかからない。

【0051】そこで駆動により変形しないダミー部を上下の端面に設け、ここにおいてプリセットの荷重を面で受けるように圧電体素子を構成する。これにより、N部のような非駆動部に対しても、充分なプリセット荷重が加わると共に、過剰な引っ張り応力がかからないようにすることができる。

【0052】ダミー部の圧電層の厚みを駆動部の圧電層の3倍以上の厚みとすることで、駆動部、バッファ部の変形を吸収することができ、プリセット荷重がN部のような非駆動部に伝達され、クラックを生じ難くすることができる。従って、駆動回数の多いインジェクタ駆動源として用いた場合に、クラックの発生を防止でき、長期にわたって使用可能な圧電体素子を得ることができる。

【0053】仮に3倍未満である場合は、駆動部、バッファ部の変形の影響を受けて、ダミー部も多少の変形を生じることがある。このため、クラックが発生したり、圧電体素子がショートするおそれがある。また、プリセット荷重が不均一にかかり、N部のような非駆動部においてクラックが発生するおそれがある。

【0054】次に、請求項1記載の発明のように、上記内部電極層はAgとPdとを含むAg・Pd含有材料よりなることが好ましい。内部電極層を低融点であるAg（融点 960.5°C ）と高融点であるPd（融点 1555°C ）とを含む材料より構成することで、圧電体素子の製造における焼成時に 1000°C 以上という高温で焼成を行っても、内部電極層の溶融や焼結粒子の凝集を防止することができ、被覆率の高い内部電極層を得ることができる。

【0055】従って、圧電層の広い範囲に電圧を印加することができ、前述した断面積の小さな圧電体素子を構成した場合であっても、インジェクタに必要とされる大変位量や高発生力を発揮する圧電体素子を得ることが

きる。なお、上記Ag・Pd含有材料中において、AgやPdはAg化合物やPd化合物の状態、合金や固溶体の状態等、多様な形態で含まれている。

【0056】次に、請求項12記載の発明のように、上記Ag・Pd含有材料において、AgとPdとの合計重量に対し、Pdは10重量%以上含有されていることが好ましい。

【0057】これにより、圧電層に対する内部電極層の被覆率を高めることができ、インジェクタ用駆動源に要求される大変位、高発生力を持つ圧電体素子を得ることができる。

【0058】Pdが10重量%未満である場合は、圧電体素子製造における焼成時に、内部電極層が溶融したり、凝集して、所望の面積や被覆率を持つ内部電極層が得難くなるおそれがある。なおPdは高価な金属であるため含有量は少ないほうが好ましい。

【0059】次に、請求項13記載の発明のように、上記Ag・Pd含有材料を構成する焼結粒子は粒径 $10\mu\text{m}$ 以下のものが焼結粒子全体の80%以上を占めていることが好ましい。

【0060】圧電体素子は駆動に伴って圧縮と引張の応力を受ける。内部電極層の厚みが $12\mu\text{m}$ 以下である場合に、粒径 $10\mu\text{m}$ より大なる焼結粒子が内部電極層全体の80%を越えて含まれる場合、内部電極層に対する焼結粒子の粒子充填率が低下するおそれがある。この場合、圧電層を構成する焼結粒子と内部電極層を構成する焼結粒子との間、内部電極層を構成する焼結粒子の相互間の接合面積が低下するおそれがある。

【0061】この場合、内部電極層—圧電層間の接合強度が低下するため、圧電体素子の耐久性も低下する。従って、駆動回数の多いインジェクタの駆動源に用いた場合、長期にわたる使用が不可能となるおそれがある。

【0062】なお、上記粒径の算出方法を説明する。図16に示すごとく、粒径を測定しようとする面に適当な大きさの四角形 α を設け、該四角形 α の一辺から対辺まで貫通するような直線 β 、直線 γ 等を設ける。そして、同図に示すごとく、各焼結粒子と各直線とが重なった部分 $r_1\sim r_9$ 等を測定し、該 $r_1\sim r_9$ 等の平均値を算出する。

【0063】次に、請求項14記載の発明のように、上記圧電層はジルコン酸チタン酸鉛を主成分とすることが好ましい。

【0064】これにより、例えば変位方向に垂直な断面積が 80mm^2 以下、変位方向に平行な長さが 60mm 以下という小型の圧電体素子であっても、インジェクタ駆動用に必要とされる変位量 $20\mu\text{m}$ 以上を得ることができる。

【0065】上記ジルコン酸チタン酸鉛は PbZrO_3 と PbTiO_3 との固溶体で、通常PZTと呼ばれる材料である。また、上記以外の各種成分、例えばBa、S

r, Ca, Hf, Mg, Nb, Mn, Sb, Co等が含まれることもある。

【0066】次に、請求項15記載の発明のように、上記圧電層はMnが含まれ、該圧電層に対し、Mnが $5 \times 10^{-3} \sim 0.4$ 重量%含まれていることが好ましい。

【0067】極微量の燃料を正確に噴射する必要があるインジェクタの駆動源に用いる圧電体素子は、高周波数で正確に変位しなければならない。Mnが含まれることで、伸縮時の結晶回転成分が少なくなり、過剰変位（オーバーシュート）が発生し難く、高周波数で正確に変位可能な圧電体素子を得ることができる。また、特に変位方向に平行な長さが60mm以下等といった小型の圧電体素子を構成した場合であっても、20 μ m以上といった大変位量を得ることができる。

【0068】Mnが 5×10^{-3} 重量%より少ない場合は結晶回転成分が多く、耐久性の低下が発生し、0.4重量%よりも多い場合は、圧電層の変位が減るため、伸縮量が低下するおそれがある。なお、Mnは通常は各種の化合物、固溶体、合金の形で含まれている。

【0069】次に、請求項16記載の発明のように、上記ジルコン酸チタン酸鉛は $Pb(Y_{0.5}Nb_{0.5})O_3-PbTiO_3-PbZrO_3$ 系3成分固溶体を基本組成とし、上記3成分固溶体中の各成分の割合が、0.5モル% $\leq Pb(Y_{0.5}Nb_{0.5})O_3 \leq 3$ モル%、42モル% $< PbTiO_3 < 50$ モル%、47モル% $< PbZrO_3 \leq 57.5$ モル%であり、SrによるPbの置換基が5モル%より多く15モル%以下であり、 Nb_2O_5 の上記ジルコン酸チタン酸鉛に対する含有量が1重量%以下、 Mn_2O_5 の上記ジルコン酸チタン酸鉛に対する含有量が0.01重量%以上、0.5重量%未満であることが好ましい。

【0070】上記組成の材料を用いることで、誘電率の温度変化が小さい圧電層よりなる圧電体素子を得ることができる。この圧電体素子は、温度変化の大きい環境で使用しても出力の変動を生じない。インジェクタは、一般に $-40 \sim 150^\circ C$ という環境で正常に作動することが要求され、上記圧電層よりなる圧電体素子を用いることで上述の温度範囲で正常に作動するインジェクタを得ることができる。

【0071】次に、請求項17記載の発明のように、上記圧電層を構成する焼結粒子は粒径8 μ m以下であることが好ましい。

【0072】粒径の大きい焼結粒子は焼結時に粒成長が生じたものであると考えられている。粒成長した焼結粒子が含まれた場合の圧電層の強度は低下する。インジェクタの駆動源に用いる圧電体素子は、例えば高荷重（プリセット荷重500N、発生力2000N）、高駆動回数（ 2×10^9 回以上）、高周波数（200Hz）、高立ち上り速度（100 μ s）等といった過酷な要件を満たす必要があるが、粒径8 μ m以下の焼結粒子より構成

される圧電層は強度が高く、このような過酷な環境下で使用される圧電体素子として最適である。

【0073】8 μ mより大きい粒径を持つ焼結粒子が含まれている場合は、圧電層の強度が低いため、上述したとき過酷な条件で使用した場合、容易にクラックが発生するなど、耐久性に劣るおそれがある。なお、粒径の定義は前述した請求項13と同様である。

【0074】次に、請求項18記載の発明のように、上記インジェクタ用圧電体素子は内燃機関の1回の燃焼に対して複数回の駆動を行なうインジェクタ用圧電体素子として最適である。内燃機関用のインジェクタは複数回の燃料噴射を行なうことで、排ガス中の NO_x やHCを減らしている。圧電体素子を利用することで、きめ細かく制御して燃料噴射状態の精密な制御を行うことができるインジェクタを得ることができるため、上述したような燃料噴射を容易かつ正確に実現できる。

【0075】

【発明の実施の形態】実施形態例1

本発明の実施形態例にかかるインジェクタ用圧電体素子1につき、図1～図6を用いて説明する。本例のインジェクタ用圧電体素子1は、図6に示すごとく、インジェクタ5に内蔵されると共にインジェクタ5の駆動力を発生する圧電体素子である。この圧電体素子1は、図2に示すごとく、印加電圧に応じて伸張する複数の圧電層11と印加電圧供給用の内部電極層21、22とを交互に積層してなる。

【0076】図1(a)に示すごとく、各圧電層11には空隙61が含まれている。一つの圧電層11に含まれる空隙61の積層方向の総厚みは圧電層11の積層方向厚みの1/3以下であると共に、一つの空隙61の積層方向厚みは50 μ m以下である。

【0077】以下、詳細に説明する。圧電体素子1は、図2に示すごとく、上記圧電層11の層間に上記内部電極層21、22を交互に正負となるように形成してなる。同図に示すごとく、一方の内部電極層21は一方の側面101に露出するように配設され、他方の内部電極層22は他方の側面102に露出するように配設されている。そして、圧電体素子1の側面101、102には、露出した内部電極層21、22の端部を導通させるように側面電極31、32を形成した。

【0078】内部電極層21、22について詳細に説明すると、内部電極層21、22で露出していない側の端部120は、図4に示すごとく、徐々に先細りとなる断面形状を有している。これは後述するごとく圧電体素子1製造の際の温水ラバープレス等による熱圧着時等に端部が潰れ、最終的に先細り形状となるのである。なお、内部電極層21、22から電圧を印加した際、内部電極層21、22と隣接する圧電層11のM部は伸縮できるが、どちらか一方の電極層しか存在しないN部は伸縮できない。

13

【0079】また、圧電体素子1においては、図2に示すごとく、積層方向の中央部分を駆動部111、これを挟持するように配置された部分をバッファ部112、さらにこのバッファ部112を挟持するように配置された部分をダミー部113とした。

【0080】この圧電体素子1の製造方法と詳細構造について説明する。本例の圧電体素子1は広く用いられているグリーンシート法を用いて製造することができる。グリーンシートは、公知の方法により圧電材料の主原料となる酸化鉛、酸化ジルコニウム、酸化チタン、酸化ニオブ、炭酸ストロンチウム等の粉末を所望の組成となるように秤量する。また、鉛の蒸発を考慮して、上記混合比組成の化学量論比よりも1~2%リッチになるように調合する。これを混合機にて乾式混合し、その後800~950℃で仮焼する。

【0081】次いで、仮焼粉に純水、分散剤を加えてスラリーとし、ボールミルにより湿式粉砕する。この粉砕物を乾燥、粉脱脂した後、溶剤、バインダー、可塑剤、分散剤等を加えてボールミルにより混合する。その後、このスラリーを真空装置内で攪拌機により攪拌しながら真空脱泡、粘度調整をする。

【0082】次いで、スラリーをドクターブレード装置により一定厚みのグリーンシートに成形する。回収したグリーンシートはプレス機で打ち抜くか、切断機により切断し、所定の大きさの矩形体に成形する。グリーンシートは駆動部、バッファ部およびダミー部に共通である。

【0083】次いで、例えば銀/パラジウム=7/3の比率からなる銀およびパラジウムのペースト（以下、Ag/Pdペーストという）により、成形後のグリーンシートの一方の表面にパターンをスクリーン印刷成形する。図3（a）、（b）にパターン印刷後のグリーンシートの一例を示す。なお説明の都合上、実質的に同一部分には同一の符号を付す。

【0084】圧電層となるグリーンシート11の表面には、上記Ag/Pdペーストにより、略全面にこれよりもやや小さなパターン21（22）を形成し、内部電極層21（22）とする。グリーンシート11の表面の対向辺の一方の側には、内部電極層21（22）の非形成部119が設けてある。つまり、グリーンシート11の対向辺の一方の端部（圧電体素子1の側面101あるいは102に相当する部分）には、内部電極層21（22）が到達せず、対向する他方の端部には内部電極層21（22）が到達するようにこれを配置した。

【0085】このような内部電極層21（22）を形成したグリーンシート11は、駆動部111、バッファ部112の変位量要求仕様に基づいて所定の積層枚数を用意する。また、バッファ部112、ダミー部113用の内部電極層を印刷していないグリーンシート12も必要枚数準備する。

14

【0086】次いで、これらのグリーンシート11、12を重ねる。図3（c）は、グリーンシート11、12の積層状態を示すもので、実質的に圧電体素子1の分解図となっている。なお、同図は主として駆動部にかかる部分を示した。内部電極層21（22）を形成したグリーンシート11を重ねる場合には、電極の非形成部119が図中左側と右側に交互に位置するように重ねる。これにより、グリーンシート11の図中右側の側面101に達して露出する内部電極層21が一方の極の内部電極となり、図中左側の側面102に達して露出している内部電極層22が他方の極の内部電極となる。

【0087】そして、中央の駆動部111においては、図3（c）に示すごとく上記内部電極層21（22）を形成したグリーンシート11のみを用いて積層し、バッファ部112においてグリーンシート11の間に内部電極層を形成していないグリーンシート12を介在させて積層し、ダミー部113においては内部電極層を形成していないグリーンシート12のみを用いて積層する。これにより、図2に示す構造の積層体となる。

【0088】次いで、温水ラバースレス等による熱圧着後、電気炉により400~700℃のもとで脱脂し、900~1200℃のもとで焼成する。次いで、上記積層体の側面に上記Ag/PdペーストまたはAgペースト等を塗布、焼き付けることにより外部電極31、32を形成する。外部電極31は、一方の極の内部電極層21が露出している位置に形成し、各内部電極層21の導通をとる。他方の外部電極32は、他方の極の内部電極層22が露出している位置に形成し、各内部電極層22の導通をとる。その後、これを絶縁油中に浸漬し外部電極31、32から内部電極層21、22間に直流電圧を印加して圧電層11を分極し、圧電体素子1を得る。

【0089】なお、上記ダミー部113は、上記のごとく駆動部111に用いた圧電層11と同じ材質のグリーンシート（圧電層）12を用いることにより、製造材料の種類が増えないようにして製造コストの低減を図った。しかしながら、このダミー部113の圧電層12を別の材料から構成してもよく、たとえば絶縁性の磁性材料により構成することもできる。なお、同図において符号315、325は絶縁板である。

【0090】また、圧電体素子1の側面部101、102の外部電極31、32には、それぞれ電極取出し部としてのリード線（図示略）を接合した。そして、圧電体素子1の積層方向に直交する側面101、102の全体に、厚さ0.005mm以上の絶縁皮膜を形成した（図示略）。本例では、上記絶縁皮膜として、シリコン系樹脂を用いた。

【0091】次に、上記圧電体素子1の圧電層11に含まれる空隙の状態と圧電体素子1の性能との関係について2つの試験を行って測定する。上述した手順にて圧電体素子を複数個作製した。これら素子における圧電層は

$\text{Pb}_{0.91}\text{Sr}_{0.09}\{(\text{Zr}_{0.538}\text{Ti}_{0.452})(\text{Y}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_{0.01}\}\text{O}_3$ という組成のPZTと Mn_2O_3 とよりなり、圧電層に対しMnは0.09重量部含まれている。

【0092】この試験で用いる圧電素子の圧電層の厚みは $180\mu\text{m}$ である。圧電素子の駆動条件は、プリセット荷重 500N 、電界強度 $0\sim 1.5\text{kV/mm}$ 、入力波形は矩形波、駆動周波数 200Hz である。駆動回数は最高で 2×10^9 回とする。駆動時に圧電素子に流れる電流値、圧電素子の電気抵抗値を測定することで、圧電素子のショートをチェックし、ショートが発生した段階で駆動を停止する。

【0093】一つの圧電層11に含まれる空隙6.1の積層方向の総厚みと圧電層11の積層方向厚みとの比、つまり図1(b)を例に上げると、 $(d1+d2+d3)/H$ の値が異なる圧電素子を表1に示すごとく5種類、それぞれ10個ずつ、合計50個準備する。これらについて上述の駆動試験を行い、駆動回数が 2×10^9 に達する前にショートした圧電素子をカウントし、表1に記載した。なお、この試験において使用した圧電素子は、圧電層の作成時にビーズを混入させることで意図的に所定量の空隙を発生させた。

【0094】同表における空隙/圧電層は、(一つの圧電層に含まれる空隙の積層方向の総厚み/圧電層の積層方向厚み)の比である。この値が $1/3$ より大きく $1/2$ 以下である場合にショートが3個発生した(表1において $1/2$ と記された行である)。その他、 $1/4$ より大きく $1/3$ 以下である場合、 $1/5$ より大きく $1/4$ 以下である場合、 $1/6$ より大きく $1/5$ 以下である場合はショートは発生しなかったことが表1よりわかった。また、空隙/圧電層の値が $1/2$ である場合は、最長でも 1×10^8 回の駆動を行うことでショートが発生した。このように空隙が圧電層の厚みにくらべて多い場合はショートしやすいことがわかった。

【0095】次に、別の80個の圧電素子を準備し、上記と同様の条件で 2×10^9 回駆動させた。この結果、80個中26個の圧電素子がショートした。ショートした圧電素子を、圧電層の積層方向と平行に切断し、各空隙の厚みを測定し、これらの厚みの全平均を算出した。算出結果を表2に記載した。表2より、ショートした圧電素子の空隙厚みはいずれも $50\mu\text{m}$ を越えており、最も空隙厚みの小さいもので $54\mu\text{m}$ であった。また、ショートしなかった圧電素子について同様に調査したところ、最も空隙厚みの大きいもので $50\mu\text{m}$ だった。

【0096】よって、空隙の総厚み/圧電層の厚みを $1/3$ 以下、空隙厚みを $50\mu\text{m}$ 以下とすることで、耐久性に優れて長期の連続駆動途中でショートが生じ難い圧電素子が得られることが分かった。このように耐久性に優れているからこそ本例にかかる圧電素子はインジ

ェクタ用として最適であることが分かった。

【0097】次に、上記構成の圧電素子1を駆動源として用いることができるインジェクタの一例について簡単に説明する。インジェクタ5は、図6に示すごとく、ディーゼルエンジンのコモンレール噴射システムに適用したものである。このインジェクタ5は、同図に示すごとく、駆動部としての上記圧電素子1が収容される上部ハウジング52と、その下端に固定され、内部に噴射ノズル部54が形成される下部ハウジング53を有している。

【0098】上部ハウジング52は略円柱状で、中心軸に対し偏心する縦穴521内に、圧電素子1が挿通固定されている。縦穴521の側方には、高圧燃料通路522が平行に設けられ、その上端部は、上部ハウジング52上側部に突出する燃料導入管523内を経て外部のコモンレール(図略)に連通している。

【0099】上部ハウジング52上側部には、また、ドレーン通路524に連通する燃料導出管525が突設し、燃料導出管525から流出する燃料は、燃料タンク(図略)へ戻される。ドレーン通路524は、縦穴521と駆動部(圧電素子)1との間の隙間50を経由し、さらに、この隙間50から上下ハウジング52、53内を下方に延びる図示しない通路によって後述する3方弁551に連通してしる。

【0100】噴射ノズル部54は、ピストンボデー531内を上下方向に摺動するノズルニードル541と、ノズルニードル541によって開閉されて燃料溜まり542から供給される高圧燃料をエンジンの各気筒に噴射する噴孔543を備えている。燃料溜まり542は、ノズルニードル541の中間部周りに設けられ、上記高圧燃料通路522の下端部がここに開口している。ノズルニードル541は、燃料溜まり542から開弁方向の燃料圧を受けるとともに、上端面に面して設けた背圧室544から開弁方向の燃料圧を受けており、背圧室544の圧力が降下すると、ノズルニードル541がリフトして、噴孔543が開放され、燃料噴射がなされる。

【0101】背圧室544の圧力は3方弁551によって増減される。3方弁551は、背圧室544と高圧燃料通路522、またはドレーン通路524と選択的に連通させる構成である。ここでは、高圧燃料通路522またはドレーン通路524へ連通するポートを開閉するボール状の弁体を有している。この弁体は、上記駆動部1により、その下方に配設される大径ピストン552、油圧室553、小径ピストン554を介して、駆動される。

【0102】次に、本例の作用効果について説明する。空隙を有する圧電層はインジェクタ用駆動源としての過酷な環境下で圧電素子のショートの原因となる。前述したごとく、インジェクタの駆動源として用いる圧電素子には、例えば 100MPa を超えるような高圧燃料

を噴射することが要求されるため、過酷な使用環境下での信頼性が要求される。インジェクタ用の圧電体素子は、例えば変位量が $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上、発生力 1000N 以上という高性能を発揮することが要求される。さらに、圧電体素子の小型化に伴って圧電層は薄くなる傾向があるが、付与される電界強度は 1.0 kV/mm 以上と高くなる傾向がある。

【0103】空隙を有する圧電層は、駆動回数が多く、高い電界強度にさらされるインジェクタ用圧電体素子としての過酷な環境下において容易に絶縁破壊が発生し、ショートする。これに伴い圧電体素子の耐久性や性能が多

【0104】空隙を有する圧電層に電圧を印加した場合、分極した空隙が圧電層の積層方向に多数存在した状態で、例えば電界強度 1.0 kV/mm 以上の高い駆動周波数による駆動を繰り返した場合、電圧印加方向で圧電層が薄くなった部分で絶縁破壊が生じ、ショートの原因となる。

【0105】本例にかかる圧電層は小さな空隙しか含んでいない。つまり、本発明にかかる圧電層は電圧印加時の絶縁性が高く、上述した問題が生じ難い。本例によれば、圧電層に含まれる空隙の総厚みが圧電層の厚みの $1/3$ 以下で、空隙厚みが $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下となるような圧電層を持った圧電体素子であれば、耐久性に優れ、長期にわたって過酷な環境で使用可能で、インジェクタの駆動源として適していることがわかった。

【0106】以上、本例によれば、インジェクタの駆動源に最適な圧電体素子を提供することができる。

【0107】なお、本例の圧電体素子 1 は、図 5 (a) に示すごとく、駆動部 111、バッファ部 112、ダミー部 113 よりなる。その他の例として、図 5 (b) に示すごとく、積層方向中央にバッファ部 112、その両側に駆動部 111 を設け、更に該駆動部 111 の両側に更に別のバッファ部 112、その両側にダミー部 113 を設ける構成がある。これにより、圧電体素子の中央部の自己発熱を緩和できる。

【0108】また、図 5 (c) に示すごとく、積層方向中央に駆動部 111、その両側にバッファ部 112 を設け、更にその両側に駆動部 111 を設け、該駆動部 111 の両側に更にバッファ部 112、ダミー部 113 を設けることもできる。これにより、図 5 (b) に示すものに比べて更に応力や自己発熱を緩和できる。

【0109】

【表 1】

10

20

30

40

50

(表1)

空隙/圧電層	ショート発生数
1/2	3
1/3	0
1/4	0
1/5	0
1/6	0

【0110】

【表 2】

(表2)

No.	空隙厚み (μm)
1	62
2	73
3	75
4	54
5	81
6	58
7	74
8	73
9	68
10	70
11	55
12	72
13	69
14	55
15	60
16	71
17	61
18	77
19	59
20	80
21	57
22	78
23	67
24	62
25	77
26	66

【0111】実施形態例 2

本例では、図 7、図 8 に示すごとく、内部電極層の厚みと圧電層の厚みとの比とクラックの発生状況について測定する。実施形態例 1 と同様の方法で、内部電極層の厚みと圧電層の厚みとの比の異なる圧電体素子を、図 8 に示すごとく 7 種類、各 5 個、合計 35 個作製した。

【0112】これらに実施形態例 1 と同様の駆動条件で 2×10^9 回の駆動を行なった。その後、クラックが発生した圧電体素子の個数をカウントし、図 8 にまとめて記載した。なお、本例の駆動で発生するクラック 63 は、図 7 に示すごとく、内部電極層 21 の端部 210 の近傍を中心に発生する。

【0113】同図より知れるごとく、(内部電極層の厚み/圧電層の厚み) の比が 0.11 倍以下であれば図 7 に示すごとくクラック 63 が発生しないことがわかった。このように内部電極層を圧電層に比して相対的に薄くすることで、内部電極層の端部付近での歪みを減らすことができ、歪み由来のクラック発生を防止することができる。

【0114】従って、(内部電極層の厚み/圧電層の厚み) を 0.11 倍以下とすることで、耐久性が高く、長

期にわたって過酷な環境で使用可能であり、インジェクタの駆動力発生用に最適な圧電体素子を得ることができる。

【0115】実施形態例3

本例では、図9に示すごとく、内部電極層の厚みとクラックの発生状況について測定する。実施形態例1と同様の方法で、内部電極層の厚みが異なる圧電体素子を図9に示すごとく11種類、各厚みについて5個ずつ、合計55個準備した。これらに対し実施形態例1と同様の駆動条件で 2×10^9 回の駆動を行なった。その後、クラックが発生した圧電体素子の個数をカウントし、図9にまとめて記載した。なお、本例の駆動で発生するクラック63は、前述した図7に示すごとく、内部電極層21の端部210の近傍を中心に発生する。

【0116】同図より知れるごとく、内部電極層の厚みが $12\mu\text{m}$ 以下であれば、クラックが発生しないことがわかった。このように内部電極層21を薄くすることで、内部電極層21の端部210付近での歪みを減らすことができ、歪み由来のクラック発生を防止することができる。従って、内部電極層21を薄くすることで耐久性が高く、長期にわたって過酷な環境で使用可能であり、インジェクタの駆動力発生用に最適な圧電体素子を得ることができる。

【0117】実施形態例4

本例では、図10及び図11に示すごとく、内部電極層と隣接する圧電層の積層面が内部電極層によって、どれだけカバーされているか、内部電極層と圧電層との面積比($S2/S1$)と圧電体素子の発生力、発生クラック数との関係について測定する。なお、図10に $S1$ と $S2$ についての具体例を記載した。

【0118】実施形態例1と同様の方法で面積比 $S2/S1$ が異なる圧電体素子を図11に示すごとく、10種類、各面積比について5個ずつ、合計50個作製した。なお、本例にて作製した圧電体素子の圧電層の断面積は 75mm^2 とした。これらに対し実施形態例1と同様の駆動条件で 2×10^9 回の駆動を行なった。その後、クラックが発生した圧電体素子の個数を、図11にまとめて記載した。なお、本例の駆動で発生するクラック63は、前述の図7に示すごとく、内部電極層21の端部210の近傍を中心に発生する。また、上記駆動において得られた発生力を各面積比にかかる圧電体素子について測定し、図11にまとめて記載した。

【0119】図11より、面積比が100%に近づくほど発生力が高くなることが分かった。しかし、面積比が98%より大きい圧電体素子についてはクラックが発生するものも認められた。

【0120】このように、本例の圧電体素子でインジェクタ駆動力発生用として必要な1000Nを得るためには、70%以上の面積比が必要であることがわかった。また、クラックの発生状況から面積比を98%以下とす

ればクラックが発生しないことがわかった。従って、圧電層の面積が 75mm^2 と小型の圧電体素子について面積比を70%~98%とすることで、より高い発生力を持つとともに、耐久性が高く、長期にわたって過酷な環境で使用可能で、インジェクタの駆動力発生用に最適となる圧電体素子が得られることが分かった。

【0121】実施形態例5

本例では、前述した図5(a)に示すとき駆動部、バッファ部、ダミー部よりなる圧電体素子において、各部の圧電層厚みとクラックの発生との関係について測定する。実施形態例1と同様の方法で各厚み比に対応する圧電体素子をそれぞれ10個ずつ準備した。すなわち、駆動部での圧電層の厚みを1とすると、ダミー部の圧電層の厚みが2.5倍から3.2倍、また、ダミー部の圧電層の厚みが1倍から5.2倍となる圧電体素子をそれぞれ3個ずつ準備した。詳細な組み合わせは表3に記載した。

【0122】これらについて、実施形態例1と同様の駆動条件で 2×10^9 回の駆動を行なった。駆動後、各層間部に発生するクラックの本数を測定した。なお、本例の駆動で発生するクラック63は、前述の図7に示すごとく、内部電極層21の端部210の近傍を中心に発生する。表3に対し、クラックが1個でも発生した圧電体素子について×を、3個とも発生しなかったものについては○を記載した。

【0123】同表によれば、駆動部の圧電層の厚みに対し、バッファ部の圧電層を1.1~5倍の厚みとし、また駆動部の圧電層の厚みに対し、ダミー部の圧電層を3倍以上とすればクラックが生じない圧電体素子が得られることがわかった。このような圧電体素子は、長期にわたって過酷な環境で使用可能であり、インジェクタの駆動力発生用に最適である。

【0124】

【表3】

(表3)

		ダミー部							
		2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
バッファ部	1.0	—	—	—	—	—	×	×	×
	1.1	—	—	—	×	×	○	○	○
	1.2	—	—	×	×	×	○	○	○
	1.3	×	×	×	×	×	○	○	—

	4.8	×	×	×	×	×	○	○	—
	4.9	—	—	—	×	×	○	○	—
	5.0	—	—	—	×	×	○	○	○
	5.1	—	—	—	—	×	×	×	×
	5.2	—	—	—	—	—	×	×	—

【0125】実施形態例6

本例では、前述した図5(a)に示すとき駆動部、バ

ッファ部、ダミー部よりなる圧電体素子において、駆動部における圧電層厚みとクラックの発生との関係について測定する。実施形態例1と同様の方法で圧電層厚みの異なる圧電体素子を各厚みについて3個ずつ準備した。なお、厚みの具体的数値は表4に記載した。なお、本例の圧電体素子は、変位方向に垂直な断面積が75mm²、変位方向に平行な長さが60mmといった小型の素子である。

【0126】これらについて、実施形態例1と同様の駆動条件で2×10⁹回の駆動を行なった。駆動後、各層間部に発生するクラックの本数を測定した。なお、本例の駆動で発生するクラック63は、前述の図7に示すごとく、内部電極層21の端部210の近傍を中心に発生する。表4に対し、クラックが1個でも発生した圧電体素子を持つセルについて×を、3個とも発生しなかったものについては○を記載した。また、クラック発生数は、クラックの発生した圧電体素子の個数である。同表より、圧電層の厚みを280μm以下とすることでクラックが生じない圧電体素子が得られることがわかった。

【0127】また、本例の作用効果について説明する。図12(a)に示すごとく、圧電体素子5は駆動にあたり積層方向について矢線Fに示すようにプリセット荷重がかけられる。そして、図12(b)に示すごとく、積層方向は伸びが生じ、積層方向に対する垂直方向は縮みが生じて鼓型に圧電体素子が変形する。

【0128】ところで、圧電体素子5の積層方向の長さが同じであれば、図12(c)に示すような厚い圧電層よりなる圧電体素子の積層数は少なく、図12(d)に示すような薄い圧電層よりなる圧電体素子の積層数は多くなる。両者において共に同じ変位が発生した場合、図12(c)に示すように圧電層51は符号510のように大きな伸びが生じ、図12(d)に示すように薄い圧電層52は符号520のように伸びが小さい。つまり、厚い圧電層よりなる圧電体素子のほうが1層あたりの変形量が大きくなる。

【0129】よって、変位量が20μm、立ち上がり時間が100μsと早く、駆動周波数が200Hzと早い圧電体素子では、鼓型の変形が大きく、かつ素早く生じるため、前述する図7に示すようなクラックが発生しやすくなる。従って、表4より知れるごとく、圧電層の厚みを280μm以下とすることで、インジェクタに要求される過酷な条件下でもクラックが発生し難い圧電体素子を得ることができる。

【0130】

【表4】

(表4)

圧電層厚み	クラックの有無	クラック発生数
250	○	0
260	○	0
270	○	0
280	○	0
290	×	2
300	×	3

【0131】実施形態例7

本例では、前述した図5(c)に示すごとく駆動部、バッファ部、ダミー部よりなる圧電体素子において、駆動部中のバッファ層の数と圧電体素子の上昇温度との関係について説明する。実施形態例1と同様の方法で試料となる圧電体素子を準備した。それぞれ駆動部中のバッファ層の数が異なる。なお、バッファ部0とは図5(a)に示すごとく圧電体素子である。

【0132】これらについて、実施形態例1と同様の駆動条件で2×10⁹回の駆動を行なった。この駆動を10時間継続し、その後の温度を測定し、駆動前から何度上昇したかを表5に記載した。同表より知れるごとく、バッファ層の数が多いほど温度の上昇が抑制された。従って、バッファ層を増やすことで駆動回数が多く高温下にあるインジェクタ用圧電素子として長期にわたって過酷な環境で使用可能な圧電体素子が得られることが本例よりわかった。

【0133】

【表5】

(表5)

駆動部中の バッファ層の数	上昇温度(℃)
0	118
1	103
2	94
3	90

【0134】実施形態例8

本例では、前述した図5(a)に示すごとく駆動部、バッファ部、ダミー部よりなる圧電体素子において、(ダミー部での圧電層の厚み/駆動部での圧電層の厚み)とクラックの発生との関係について、実施形態例5で得た表3に基づいて説明する。(ダミー部での圧電層の厚み/駆動部での圧電層の厚み)が2.7以下であるものについてはショートが発生した。また、2.8及び2.9のものについてはクラックが生じたことがわかった。しかし、3.0を越えたものについてはクラックもショートも生じないことがわかった。

【0135】ところで図13(a)に示すごとく、駆動部及びバッファ部のみよりなる圧電体素子69と、図13(b)に示すごとく、駆動部、バッファ部、ダミー部よりなる圧電体素子6とを考える。圧電体素子69は矢線Fに示すごとく、プリセット荷重を付与しつつ駆動することで、積層方向に伸びて、垂直方向に縮むことから

同図に示す鼓型に変形する。図13(b)はダミー部を設けてあるため、同図に示すような上下端面が平坦な状態で変形する。

【0136】インジェクタの駆動源として用いる圧電体素子には上述したとき過酷な条件下において駆動される。例えば変位量が $20\mu\text{m}$ 以上、立ち上がり時間は $100\mu\text{s}$ 等という駆動である。上記条件による駆動が、例えば 200Hz という駆動周波数で行われる場合、前述した図4のN部のような変位しない箇所、駆動されたい箇所に過剰な引張応力がかからないようにする必要が

【0137】しかし、駆動部は駆動時にその形状が鼓型となるため、上下の端面からプリセット荷重を加えた場合、駆動部とプリセット荷重を与える面との間が点接触となるおそれがある。この場合、非駆動部であるN部にはプリセット荷重が殆どかからない。

【0138】そこで駆動により変形しないダミー部を上下の端面に設け、ここにおいてプリセットの荷重を面で受けるように圧電体素子を構成する。これにより、N部のような非駆動部に対しても、充分なプリセット荷重が加わると共に、過剰な引っ張り応力をかからないようにすることができる。

【0139】ダミー部の圧電層の厚みを駆動部の圧電層の3倍以上の厚みとすることで、駆動部、バッファ部の変形を吸収することができ、プリセット荷重がN部のような非駆動部に伝達され、クラックを生じ難くすることができる。従って、駆動回数の多いインジェクタ駆動源として用いた場合に、クラックの発生を防止でき、長期にわたって使用可能な圧電体素子を得ることができる。

【0140】実施形態例9

本例では、内部電極をAg・Pd含有材料より構成した際のPdの含有量と電極被覆率との関係について測定する。実施形態例1と同様の方法で内部電極層でのPdの含有量の異なる4種類の圧電体素子を準備した。なお、本例の圧電体素子は変位方向に垂直な断面積が 75mm^2 、変位方向に平行な長さが 60mm といった小型の素子である。また、実施形態例1と同様の方法で内部電極層が銀のみよりなる圧電体素子を準備した。

【0141】これらの圧電体素子の電極被覆率を圧電体素子をスライスして電子顕微鏡で観察して測定したところ、図14に示すごとく、銀のみで内部電極層を構成した場合の被覆率は低く、Pdの含有量が増えるほど、高い被覆率が得られることがわかった。

【0142】特に 2000N 以上の高い発生力を得るためには70%以上の電極被覆率を持つことが好ましいが、その場合はPdの含有量を10重量%以上とすることが好ましいことが解った。

【0143】実施形態例10

本例では、内部電極層がAg・Pdよりなり、これを構成する焼結粒子の粒径の状態とクラックの発生との関係

について測定する。

【0144】実施形態例1と同様の方法で焼成による粒成長を考慮して、粒径が異なる圧電体素子を6種類、各3個づつ、合計18個作製した。なお、粒径は焼成が終わった後に測定したが、この測定方法は後述する実施形態例12に詳細を記載した。また、ここで作製した圧電体素子の圧電層の積層方向の断面積は 75mm^2 とした。

【0145】これらに対し実施形態例1と同様の駆動条件で 2×10^9 回の駆動を行なった。その後、クラックが発生した圧電体素子をカウントし、表6にまとめて記載した。上記測定の結果、粒径が $9.8\mu\text{m}$ 以下ではクラックが生じなかったが、 $11.2\mu\text{m}$ ではクラックが生じた(3個のうち2個)ことがわかった。このように、内部電極層での焼結粒子の粒径が $10\mu\text{m}$ 以下である圧電体素子は長期にわたって過酷な環境で使用可能であり、インジェクタの駆動力発生用に最適であることがわかった。

【0146】

【表6】

(表6)

粒径 (μm)	クラックの有無
3.1	○
5.0	○
6.7	○
8.3	○
9.8	○
11.2	×

【0147】実施形態例11

本例では、圧電層に含まれるMnの量と圧電体素子の変位量、耐久性とについて測定する。実施形態例1と同様の方法で試料となる圧電体素子を準備するが、この時、圧電層の組成を適宜変更する。各試料の圧電層は $\text{Pb}0.91\text{Sr}0.09 : (\text{Zr}0.538\text{Ti}0.452) (\text{Y}0.5\text{Nb}0.5)0.01\text{O}_3$ という組成のPZTと Mn_2O_3 とよりなる。そして、圧電層に対し、Mnが0(つまりPZTのみ)、 5×10^{-3} 重量%、 1×10^{-2} 重量%、 1.5×10^{-2} 重量%含まれる圧電体素子を各組成について4個づつ、合計16個、実施形態例1と同様に準備した。

【0148】これらについて実施形態例1と同様の駆動条件で 2×10^9 回の駆動を行なった。その後、ショートの有無、クラックの本数を測定した。この結果を表7に記載した。なお、本例の駆動で発生するクラック63は、前述の図7に示すごとく、内部電極層21の端部210の近傍を中心に発生する。Mnが 5×10^{-3} 重量%以上含まれている圧電層よりなる圧電体素子はショートもなく、クラックも生じなかったが、Mnが含まれていない圧電層よりなる圧電体素子はショートしたり、クラックが発生した。

【0149】また、実施形態例1と同様の方法で試料と

なる圧電体素子を準備するが、この時、圧電層の組成を変更する。各試料の圧電層は上記と同様のPZTとMn₂O₃とよりなる。そして、圧電層に対するMnの含有量を違えた圧電体素子を、実施形態例1と同様にして準備した。

【0150】この圧電体素子を実施形態例1と同様に駆動して、変位量をレーザー変位計で測定した。この結果を図15に記載した。図15より、Mnが少ないほど変位量が大きいことが分かった。つまりMnを入れすぎるとインジェクタ用として要求される大きな変位量が得難くなる可能性が示唆される。

【0151】以上より、Mnは少ないとクラック防止効果が薄く、多すぎると変位量が減少してしまうことから、圧電層に対し $5 \times 10^{-3} \sim 0.4$ 重量%含まれていることがよいことが分かった。

【0152】

【表7】

(表7)

Mn含有量(重量%)	ショート発生数	クラック発生数
0	1	3
5×10^{-3}	0	0
1×10^{-2}	0	0
1.5×10^{-2}	0	0

【0153】実施形態例12

本例は、圧電層の粒径の分布と変位量、耐久性について測定する。実施形態例1と同様の方法で試料となる圧電体素子を準備するが、焼成後の粒成長を考慮して同程度の粒径を持つ圧電層が得られるようにした。そして、ほぼ同じ粒径の圧電層よりなる圧電体素子をそれぞれ3個準備した。また、各圧電体素子の変位量を実施形態例11と同様に測定した。また、圧電層の粒径を図16に示すとおり測定した。

【0154】つまり、圧電体素子を切断し、圧電層の断面を露出させる。この断面を走査型顕微鏡で焼結粒子の粒界が判別できる写真を撮影する。ここにおいて、一片が $50 \mu\text{m}$ となる四角形 α を設け、該四角形 α の一辺から対辺まで貫通するような直線 β 、直線 γ 等を設ける。この直線は全部で10本ランダムに設けた。そして、同図に示すごとく、各焼結粒子と各直線とが重なった部分 $r_1 \sim r_9$ 等を測定し、該 $r_1 \sim r_9$ 等の平均値を算出し、これを粒径とする。

【0155】圧電体素子を準備して、これらについて実施形態例1と同様の駆動条件で駆動させショートやクラックの発生状況を調べた。この結果は表8に記載した。なお、本例の駆動で発生するクラック63は、前述の図7に示すごとく、内部電極層21の端部210の近傍を中心に発生する。

【0156】表8より、粒径が $8 \mu\text{m}$ 以下のものはショートもクラックも生じなかった。粒径が $8.5 \mu\text{m}$ では 2×10^6 回の駆動は可能であったが、クラックが発生

した。粒径が $9.2 \mu\text{m}$ では 2×10^6 回駆動するまえにショートが発生した。

【0157】以上より、粒径が大きすぎるとクラックが生じるため、圧電層の焼結粒子の粒径は $8 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましいことが分かった。

【0158】なお、本発明では圧電体素子断面が矩形形状について適用したが、本発明はこれに限るものではなく、図17に示すごとく、圧電体素子1の断面がたる型形状や丸型形状、図18に示すごとく、八角形状であるものに適用しても、同様の効果を得ることができる。

【0159】

【表8】

(表8)

粒径(μm)	ショート発生数	クラック発生数
6.8	0	0
7.6	0	0
8.0	0	0
8.5	0	3
9.2	3	3

20 【図面の簡単な説明】

【図1】実施形態例1における、(a)空隙の含まれる圧電層の要部説明図、(b)空隙の積層方向の総厚み及び空隙の積層方向厚みの説明図。

【図2】実施形態例1における、(a)圧電体素子の斜視図、(b)圧電体素子の積層方向断面説明図。

【図3】実施形態例1における、(a)、(b)一枚の圧電層と内部電極層の平面図、(c)圧電層と内部電極層との積層状態を示す斜視展開図。

30 【図4】実施形態例1における、内部電極層の端部の状態を示す説明図。

【図5】実施形態例1における、(a)～(c)駆動部、パッファ部、ダミー部よりなる各種の圧電体素子の説明図。

【図6】実施形態例1における、インジェクタの断面説明図。

【図7】実施形態例2における、内部電極層の端部から圧電体素子の側面に向かって生じるクラックの説明図。

40 【図8】実施形態例2における、(内部電極層の厚み/圧電層の厚み)の比とクラックが発生した圧電体素子の個数との関係を示す線図。

【図9】実施形態例3における、内部電極層の厚みとクラックが発生した圧電体素子の個数との関係を示す線図。

【図10】実施形態例4における、圧電層のS1とS2とについて示す説明図。

【図11】実施形態例4における、(内部電極層の面積S2/圧電層の面積S1)とクラックの発生した圧電体素子個数と、発生力との関係を示す線図。

50 【図12】実施形態例6における、(a)、(b)プリセット荷重が加えられた圧電体素子の駆動状態を示す説

明図, (c) 厚い圧電層の変位状態の説明図, (d) 薄い圧電層の変位状態の説明図。

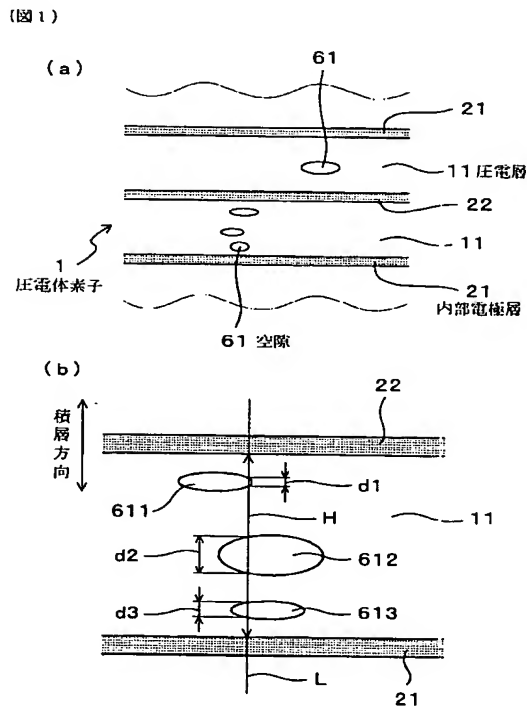
【図 13】実施形態例 8 における, (a) 駆動部とバッファ部のみよりなる圧電体素子の説明図, (b) 駆動部, バッファ部及びダミー部よりなる圧電体素子の説明図。

【図 14】実施形態例 9 における, Pd 含有量 (重量部) と電極被覆率 (%) との関係を示す線図。

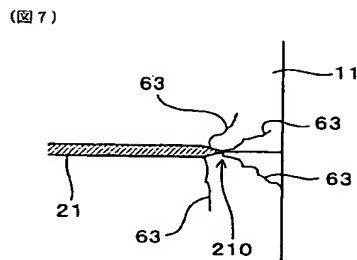
【図 15】実施形態例 11 における, Mn の含有量と変位量との関係を示す線図。

【図 16】実施形態例 12 における, 粒径と変位量との

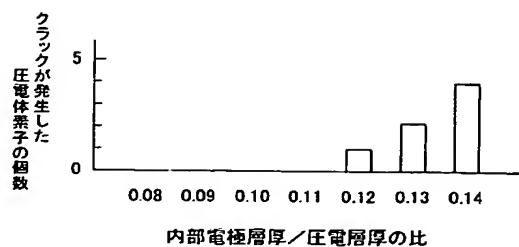
【図 1】



【図 7】



(図 8)



関係を示す線図。

【図 17】断面がたる型である圧電体素子の斜視図。

【図 18】断面が八角形である圧電体素子の斜視図。

【符号の説明】

1 . . . 圧電体素子,

11 . . . 圧電層,

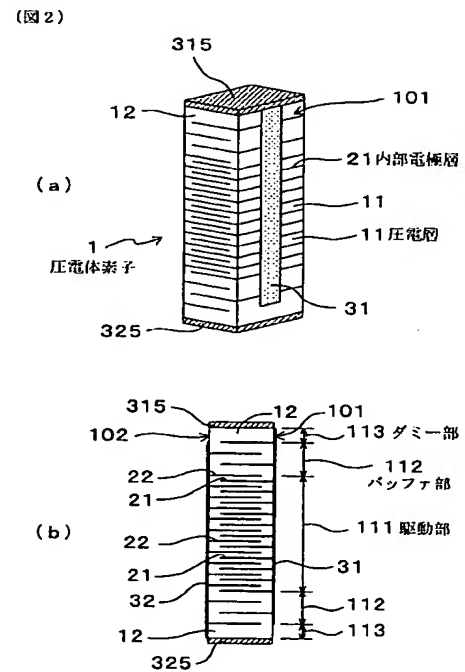
111 . . . 駆動部,

112 . . . バッファ部,

113 . . . ダミー部,

10 21, 22 . . . 内部電極層, . . .

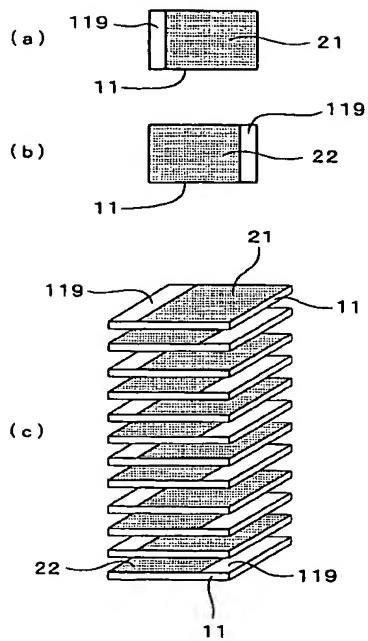
【図 2】



【図 8】

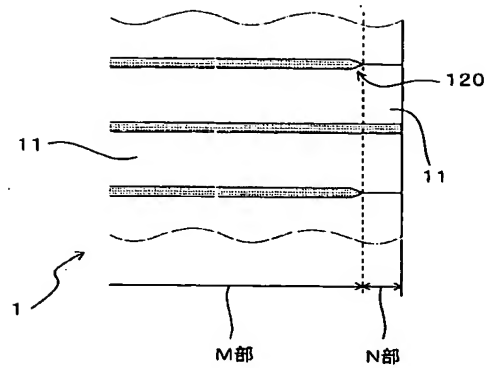
【図3】

(図3)



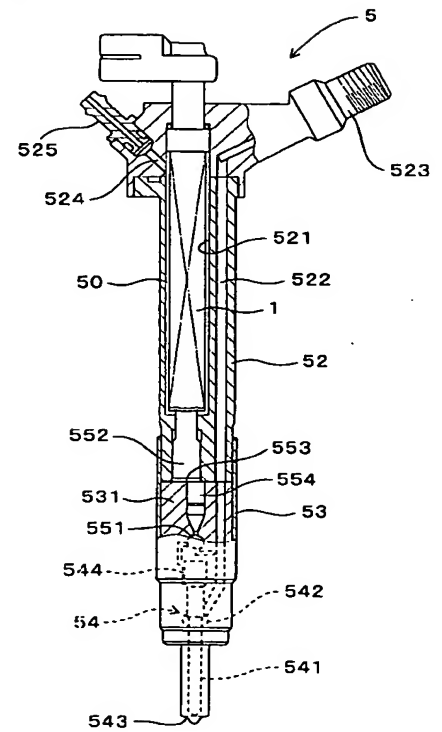
【図4】

(図4)

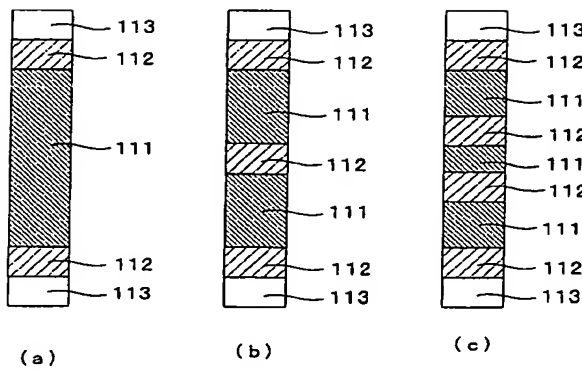


【図6】

(図6)



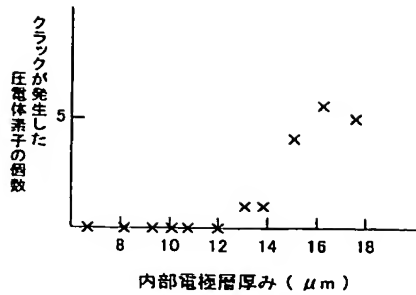
【図5】



(図5)

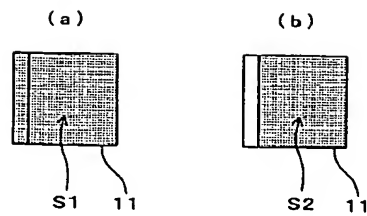
【図9】

(図9)



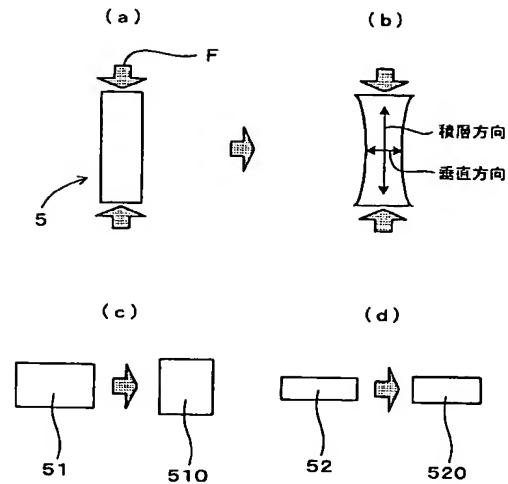
【図10】

(図10)



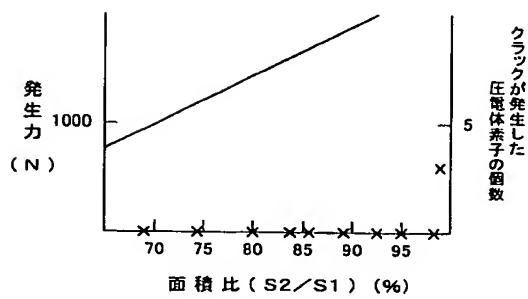
【図12】

(図12)



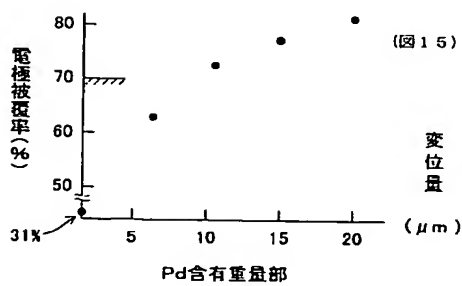
【図11】

(図11)



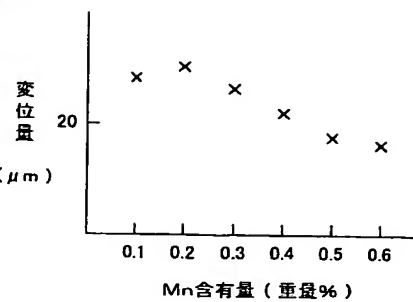
【図14】

(図14)



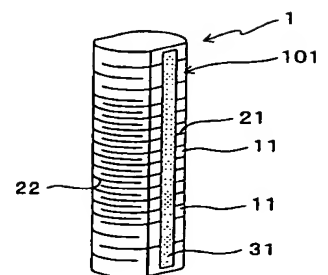
【図15】

(図15)



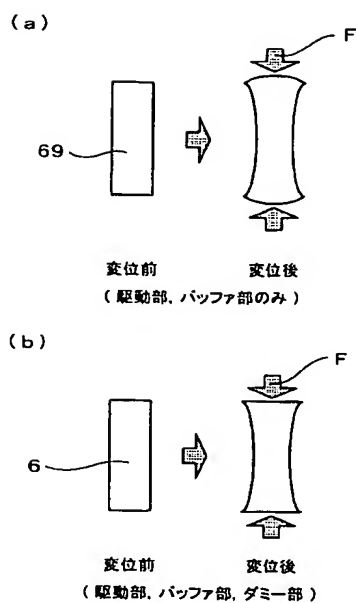
【図17】

(図17)



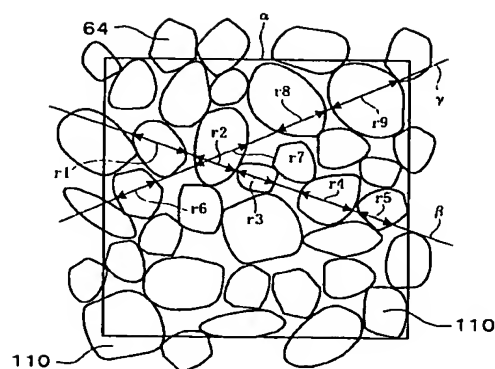
【図13】

(図13)



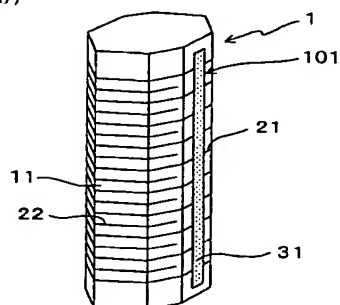
【図16】

(図16)



【図18】

(図18)



フロントページの続き

(72)発明者 山本 孝史
愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会
社デンソー内

Fターム(参考) 3G066 AA07 AB02 AC09 AD12 BA46
CC06T CC14 CC67 CC68U
CD15 CD26 CD28 CE13 CE27